

STUDI LIMBAH RADIOAKTIF YANG DITIMBULKAN DARI OPERASIONAL PLTN PWR 1000 MWe

Husen Zamroni

Pusat Teknologi Limbah Radioaktif-BATAN

ABSTRAK

STUDI LIMBAH RADIOAKTIF YANG DITIMBULKAN OPERASIONAL DARI PLTN PWR 1000 MWe, Limbah radioaktif yang ditimbulkan dari Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) dengan daya 1000 MWe terdiri dari limbah aktivitas rendah, sedang dan aktivitas tinggi. Jumlah limbah aktivitas rendah dan sedang dari PLTN setelah dilakukan pengolahan sekitar 300-400 drum 200 liter pertahun. Bahan bakar bekas yang ditimbulkan dari PLTN selama satu tahun sebanyak 25-30 ton dengan volume sekitar 35-50 m³. Limbah radioaktif yang ditimbulkan dari PLTN telah dilakukan pengelolaan sesuai dengan standar keselamatan nuklir.

ABSTRACT

STUDY OF RADIOACTIVE WASTE GENERATED FROM NUCLEAR POWER PLANT PWR 1000 MWe. Radioactive wastes generated from operation nuclear power plant 1000 MWe generally consist of low level waste, intermediate level waste and high level waste. Amount of low and intermediate level waste from nuclear power plant after treatment approximately 300-400 drum 200 litter every year. Spent fuel was generated from nuclear power plant as many as 25-30 tones with volume 35-50 m³ per year. The radioactive waste generated from nuclear power plant (NPP) have been managed according to the nuclear safety standard.

PENDAHULUAN

Pembangunan Indonesia yang berkembang pesat perlu didukung dengan peningkatan energi yang memadai. Dalam rangka memenuhi kebutuhan energi tersebut pemerintah bermaksud membangun Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) pertama pada tahun 2016. Pembangunan PLTN yang rencananya akan dibangun di semenanjung Muria saat ini masih ada kendala non-teknis yang disebabkan oleh informasi yang diterima masyarakat kurang memadai. Memang pembangunan PLTN disamping akan mencukupi kebutuhan energi yang sangat diperlukan untuk menunjang pembangunan tetapi tidak dapat di pungkiri dampak pembangunan PLTN ini juga akan menimbulkan limbah radioaktif. Informasi mengenai limbah radioaktif yang ditimbulkan oleh PLTN baik dari segi kualitatif maupun kuantitatif yang sampai ke masyarakat sangat beragam terutama yang datang dari Lembaga Swadaya Masyarakat (LSM) sehingga tidak memberikan informasi yang sepenuhnya benar.

Banyak sekali pertanyaan dari masyarakat kalau PLTN dibangun mau di kemanakan limbah yang ditimbulkan atau pertanyaan apakah bangsa Indonesia sudah dapat mengelola limbah radioaktif atau pertanyaan-pertanyaan yang sejenis. Pertanyaan-pertanyaan ini tidak bisa di jawab hanya dengan kata-kata tetapi memang memerlukan jawaban yang lebih konkret baik dari segi *software* maupun *hardware*nya. *Software* artinya kita harus punya data-data konkret mengenai jumlah dan jenis limbah radioaktif yang ditimbulkan dari sebuah PLTN dan pengalaman pengelolaannya selama ini dan tentunya pengalaman negara lain yang sudah mempunyai PLTN, sedangkan *hardware* yaitu perlunya fasilitas yang cukup untuk latihan penanganan limbah radioaktif yang ada.

Studi mengenai jumlah dan jenis limbah yang ditimbulkan dari PLTN sangat diperlukan sehingga bisa menjawab pertanyaan-pertanyaan tentang kesiapan menangani limbah PLTN jika nanti jadi di bangun. Juga sangat diperlukan studi bagaimana pengalaman negara-negara yang sudah banyak mempunyai PLTN mengelola limbah selama *predisposal* sampai *disposal*. Limbah yang ditimbulkan dari operasi PLTN dilihat dari bentuk fisiknya dibagi menjadi menjadi tiga bagian yaitu : Limbah radioaktif padat, cair dan gas sedangkan kalau dari aktivitasnya diklasifikasikan secara umum menjadi tiga kelompok juga yaitu limbah radioaktif aktivitas rendah, sedang dan tinggi. Di dalam makalah ini akan dipelajari jenis dan jumlah limbah radioaktif yang ditimbulkan dari operasi PLTN khususnya PLTN tipe PWR 1000 Me yang meliputi limbah radioaktif aktivitas rendah, sedang, dan tinggi baik dalam bentuk gas, cair, dan padat termasuk bahan bakar bekas.

LIMBAH RADIOAKTIF GAS DARI PLTN

Limbah radioaktif gas dari PLTN biasanya berupa produk fisi (hasil belah) yang timbul karena reaksi fisi pada bahan bakar yang bisa lolos keluar dari kelongsong bahan bakar. Dalam kondisi operasi normal, jumlah gas hasil fisi yang bisa lolos dari kelongsong bahan bakar sangat kecil. Pembakaran bahan bakar dari PLTN dibatasi sesuai batas *burn-up* yang sudah ditetapkan sehingga kerusakan kelongsong bahan bakar dapat dihindari dan peningkatan limbah gas hasil fisi dapat dicegah. Secara umum limbah gas yang timbul antara lain adalah gas mulia (*noble gas*), Iodine, Karbon-14 dan Tritium disajikan pada **Tabel 1**[1]. Gas mulia yang terbentuk adalah dari produk fisi dan biasanya terbawa dalam bentuk gas antara lain Kr – 85, Kr - 85m, Kr – 87, Kr – 88, Xe -133 Xe -131m, Xe -133m, Xe -135m, Xe -135 dan Xe- 138. Terbentuknya Karbon-14 di dalam sistem pendingin reaktor disebabkan oleh adanya aktivasi isotop Oksigen-17 dan Nitrogen-14 oleh netron. Jumlah Karbon-14 terbesar yang terbentuk disebabkan oleh reaksi $O_{17}(n,\alpha)C_{14}$, sedangkan jumlah Karbon-14 yang terbentuk dari reaksi $N_{14}(n, p)C_{14}$ jauh lebih sedikit.^[2]

Sumber utama timbulnya tritium (3_1H) didalam reaktor air tekan (PWR) adalah dari pembelahan rangkap tiga, reaksi tangkapan netron oleh boron, deuterium, litium yang ada dalam air pendingin, dan dari *Control Element Assemblies* (CEAs). Tritium yang timbul di dalam pendingin secara langsung menambah keseluruhan aktivitas tritium, disamping aktivitas tritium yang ditimbulkan karena pembelahan inti dan tangkapan neutron di dalam CEAs yang selanjutnya keluar ke pendingin melalui kelongsong (cladding). Jumlah tritium yang timbul karena reaksi aktivasi

disajikan dalam **Tabel 2**, sedangkan tritium yang timbul karena reaksi no. 5 dan no. 6 (B-11 dan N-14 sumber) tidak begitu banyak jumlahnya sehingga tidak memberikan banyak kontribusi penting. Hal ini disebabkan oleh tampang lintang dan/atau kelimpahan masing-masing unsur yang rendah sehingga dapat diabaikan. Sumber utama tritium dalam pendingin dan Control Element Assemblies (CEAs) di sebabkan oleh reaksi-reaksi dari no.1 s/d no. 4 (B-10, Litium, dan Deuterium).

Limbah radioaktif gas yang timbul diolah melalui beberapa tangki yang berisi bahan penyerap seperti karbon aktif dan hepa filter [**Gambar 1**]. Sistem pengolahan limbah gas (SPLG) dirancang berfungsi sebagai tempat peluruhan, kontrol, pelepasan dll. Gas-gas yang timbul diolah sampai konsentrasi dan kuantitasnya dapat diturunkan sehingga dosis yang diterima oleh publik di sekitar unit pembangkit akibat pembuangan limbah gas tersebut memenuhi standar yang ditentukan.

Tabel 1. Estimasi limbah gas yang ditimbulkan dari berbagai jenis PLTN

Limbah gas (Bq/yr)	PWR (1000MWe)	BWR (1000 Mwe)	PHWR (900 Mwe)
Gas Mulia	2×10^{13}	1.9×10^{14}	5×10^{11}
Iodin	1.5×10^8	3.7×10^{11}	1.9×10^8
Karbon-14	2×10^{10}	3.4×10^{11}	1.2×10^{14}
Tritium	N.A	N.A	1.2×10^{14}

Tabel 2. Reaksi Aktivasi Tritium

Reaksi	Energy Ambang (MeV)	Tampang Lintang
1) $^{10}\text{B}(n,2\alpha)\text{T}$	1,4	1.15(+1) mb
2) $^7\text{Li}(n,n\alpha)\text{T}$	3,9	9,50(0) mb
3) $^6\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$	Thermal	9,40(+5) mb
4) $\text{D}(n,\gamma)\text{T}$	Thermal	5,50 (-1) mb
5) $^{11}(\text{n,T})\text{BeT}$	10.4	<8,0 (-3) mb
6) $^{14}\text{N}(n,2\alpha)^{12}\text{C}$	4,3	3,00(-1) mb

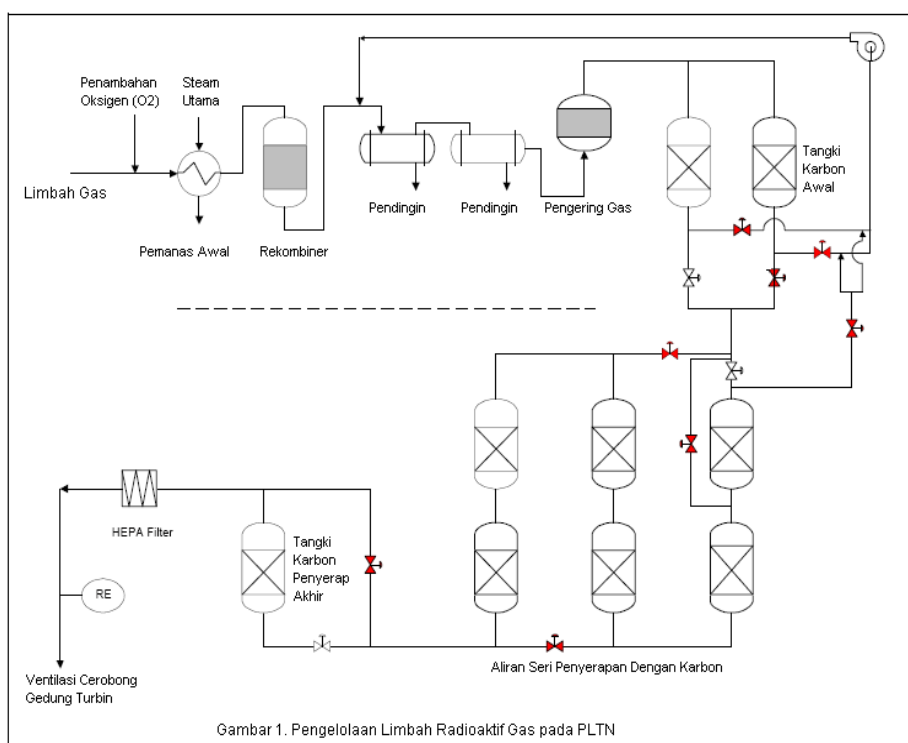
SPLG terdiri dari satu tangki drain utama, dua alat pengering limbah gas, dua tangki *charcoal*, empat tangki tunda berisi karbon aktif, satu *High Efficiency Particulate Air* (HEPA) filter, pipa-pipa termasuk valve-valve dan instrumentasi. SPLG menggunakan *charcoal* pada suhu lingkungan untuk menunda gas radioaktif yang melintasi sistem. Desain operasi banyaknya karbon aktif yang ditempatkan dalam tangki harus cukup untuk menyerap sedikitnya 45 hari untuk waktu tunda Xenon dan sedikitnya 3.5 hari untuk waktu tunda Krypton. Kondisi alat pengering limbah radioaktif dipasang pada pengolah gas untuk menjaga embun dan temperatur sehingga gas dapat mencapai tangki *charcoal*.

Semua kondensasi cairan yang terbentuk di dalam proses gas utama pada bangunan pelengkap dan di dalam SPLG masuk melalui pipa-pipa dikumpulkan di dalam tangki drain utama pada SPLG. Tangki juga digunakan untuk mengumpulkan air kondensasi yang dipindahkan dari alat pengering limbah gas.

Alat pengering limbah radioaktif gas dingin dari kondensasi dan tangki penundaan digunakan untuk menghilangkan uap air pada titik embun di bawah 46°F

(7.8°C) sebelum gas masuk melalui penyaring awal. Sensor kelembaban alat pengering limbah radioaktif gas disediakan untuk mendeteksi kehilangan embun. Tangki awal yang berisi karbon aktif (*Charcoal guard*) dipasang sebelum gas masuk tangki tunda utama. Tangki awal (*guard bed*) dipasang untuk melindungi tangki tunda charcoal utama dari banyaknya embun (*moisture*) yang masuk. Radionuklida-radionuklida berumur pendek dan Iodium ditangkap untuk peluruhan di tangki karbon aktif awal.

HEPA filter dan karbon aktif yang sudah jenuh akan diolah sebagai limbah padat. Setelah melewati tangki peluruhan, limbah gas mengalir melalui penyaring partikulat (HEPA), termasuk debu karbon aktif, ditangkap kemudian dipindahkan ke sistem bangunan HVAC. HEPA filter dan karbon aktif yang sudah jenuh akan diolah sebagai limbah padat.



Gambar 1. Pengelolaan Limbah Radioaktif Gas pada PLTN

LIMBAH RADIOAKTIF CAIR DARI PLTN

Limbah radioaktif cair yang ditimbulkan dari PLTN secara umum dapat dibagi menjadi dua bagian yaitu aktivitas rendah dan aktivitas sedang. Limbah radioaktif cair ini kebanyakan berasal dari pendingin reaktor baik pendingin primer maupun pendingin sekunder, kebocoran-kebocoran pada valve, pompa-pompa, bocoran pada lantai, limbah *laundry*, limbah dekontaminasi, larutan regenerasi resin, personil dekontaminasi (*shower*) dll.

Jenis radionuklida yang terdapat dalam limbah radioaktif cair antara lain H-3, Na-24, Cr-51, Mn-54, Fe-55, Fe-59, Co-58,

Co-60, Ni-63, Zn-65, Sr-89, Sr-90, Sr-91, Y-90, Zr-95, Mo-99, I-31, I-132, Cs-134, Cs-136, Cs-137 dll. Radionuklida dalam limbah radioaktif cair tersebut berasal dari aktivasi air pendingin, produk fisi yang lolos dan larut dalam air pendingin, dan produk korosi yang teraktivasi. Estimasi aktivitas limbah radioaktif cair yang ditimbulkan dari berbagai PLTN di sajikan pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Estimasi aktivitas limbah radioaktif cair pada kondisi operasi normal

Limbah Cair (Bq/yr)	PWR (1000MWe)	BWR (1000 Mwe)	PHWR (900 Mwe)
Tritium	2×10^{13}	2.2×10^{12}	7×10^{13}
Total nuklida lain	2.7×10^{10}	3.7×10^9	5×10^9

Berdasarkan aktivitasnya limbah radioaktif dibagi menjadi dua bagian yaitu limbah aktivitas rendah dan aktivitas sedang. Pembagian aktivitas ini bisa saja berbeda tiap waktu sesuai dengan perkembangan teknologi pengolahan dan pengelolannya. Menurut *Eurochemic Decommissioning* secara batasan kuantitatif antara aktivitas rendah dan sedang ditunjukkan pada **Tabel 4**.

Tabel 4. Batasan tingkat aktivitas rendah dan sedang

Tingkat	Pemancar	Kuantitas
Aktivitas Rendah (<i>Low Level Waste</i>)	Beta/Gamma	40 GBq/m ³
	Alpha	40 MBq/m ³
	Laju dosis	2 mSv/jam
Aktivitas Sedang (<i>Intermediate Level Waste</i>)	Beta/Gamma	20000 GBq/m ³
	Alpha	8000 GBq/m ³
	Laju dosis	2,5 mSv/jam

Limbah radioaktif cair yang timbul dari PLTN jumlahnya cukup besar, akan tetapi limbah radioaktif cair tersebut dapat diolah untuk reduksi volume limbah dengan berbagai cara seperti evaporasi, pengendapan, penggunaan membran, filter dan resin penukar ion seperti **Gambar 2**^[2]. Setelah mengalami pengolahan maka volumenya akan tereduksi (berkurang sangat banyak) di tunjukkan pada **Tabel 5**. Limbah cair yang telah diolah selanjutnya dilakukan *immobilisasi* (pengungkungan) limbah melalui proses *solidifikasi* (pemadatan) dengan semen/polimer.

Tabel 5. Jumlah limbah setelah diolah pada PWR 1000 Mwe pada kondisi normal

Tipe Limbah	Volume Tahunan (m ³)	Aktivitas tahunan (Ci)
Sludge dari evaporator	25-63	100-115
Resin bekas	30-40	1000-6000
Sludge dari filter	45-130	25-30

LIMBAH RADIOAKTIF PADAT DARI PLTN

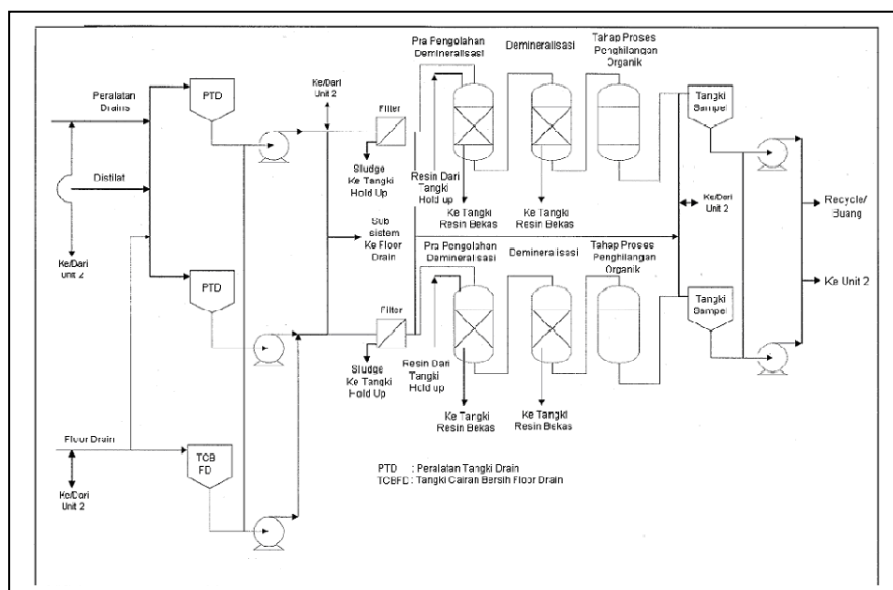
Limbah padat yang timbul dari PLTN cukup banyak, bermacam-macam limbah padat seperti kain, kertas dan kotak/bungkusan kecil karbon aktif, kertas, *shoe cover*, pakaian lab, filter bekas dari sistem zat cair dan filter bekas dari sistem sirkulasi udara dll. Limbah padat di bagi ke dalam limbah padat yang terbakar dan tidak terbakar, terkompaksi dan tidak terkompaksi. Limbah padat yang timbul ini lebih 90 % termasuk dalam aktivitas sangat rendah dan hanya 10 % yang mengandung nuklida aktif dengan paparan kontaknya lebih kecil 0.5 m Gy/h.

Jumlah limbah radioaktif padat yang ditimbulkan tiap tahun dari operasi PLTN 1000/900 Mwe adalah sekitar 1200 m³. Limbah padat ini setelah diolah dengan kompaksi, insenerasi dan sementasi seperti ditunjukkan dalam Gambar 3 maka jumlah total limbah padat berkisar antara 300-400 drum/tahun dengan 10 % nya berisi IL.^[3] Selain limbah padat tersebut di atas, ada limbah padat hasil pengolahan dari limbah gas dan limbah cair serta limbah semi cair (limbah resin bekas) yang hasil pengolahan akhirnya berbentuk kemasan limbah padat yang siap disimpan. Jumlah limbah padat hasil pengolahan yang ditimbulkan tergantung dari tipe reaktor dan kondisi operasi. Secara umum komposisi limbah padat PLTN 1000 Mwe ditunjukkan pada **Tabel 6**.

Tabel 6. Limbah radioaktif padat LLW/ILW dari operasi PWR [1]

	Volume tiap tahun (m ³)
Volume limbah sebelum diolah pertahun	50 m ³ (<i>solidified liquid</i>) 375 m ³ (<i>combustible rag, poly-sheet, wood</i>) 12 m ³ (<i>rubber, spent charcoal</i>) 30 m ³ (<i>spent resin</i>) 35 m ³ (<i>incombustible air filter</i>) 10 pc (<i>incombustible liquid filter</i>) 4 m ³ (<i>incombustible insulation</i>)
Pengolahan (<i>treatment and conditioning</i>)	Evaporasi Insenerasi Kompaksi Sementasi
Volume akhir pertahun	300-400 drum 200 L

Radionuklida yang terdapat dalam limbah padat antara lain : Sr-90, Y-91, Zr-95, Nb-95, Ru-103, Ru-106, Ag-110m, Te-129m, I-131, Cs-134, Cs-136, Cs-137, Ce-144, Cr-51, Mn-54 Fe-55, Fe-59, Co-58 dan Co-60. Produk fisi berumur panjang yang dominan adalah Cs-137 (30 tahun, gamma 0,6 Mev), sedangkan Fe-59 (45 hari, gamma 1,1 Mev) merupakan nuklida hasil aktivasi yang agak susah pengelolaannya untuk jangka pendek. Data mengenai jumlah limbah yang ditimbulkan dari berbagai PLTN PWR dengan daya yang berbeda-beda di tunjukkan pada **Tabel 7**.



Tabel 7. Data limbah radioaktif yang ditimbulkan dari berbagai PLTN PWR di Amerika Serikat .

PLTN	Periode	Volume Meter Cubic			
		Total aktivitas tinggi	Total aktivitas Rendah	Filter Mekanik	Limbah aktif kering
South Texas Project 1&2 Units, 2500 MWe	Jan-Des '89	0	23.28	0	26.98
	Jan-Des '90	4.05	7.53	0	22.98
	Jan-Des '91	17.87	33.19	1.95	46.81
	Jan-Des '92	19.86	36.89	1.03	24.75
	Jan-Des '93	9.69	17.98	1.11	26.76
Wolf Creek, 1 Unit 1160 Mwe	Jan-Des '89	N/D	N/D	N/D	N/D
	Jan-Des '90	3.47	8.11	0	35.72
	Jan-Des '91	8.15	19.05	0	28.33
	Jan-Des '92	3.89	9.09	1.57	18.89
	Jan-Des '93	4.736	11.05	0	26.48
San Onofre 2&3 Units 2150 Mwe	Jan-Des '89	25.042	48.61	1.96	116.93
	Jan-Des '90	0	0	1.78	86.94
	Jan-Des '91	8.01	15.57	0	69.95
	Jan-Des '92	46.89	91.02	3.37	72.45
	Jan-Des '93	0	0	2.11	35.87
Sequoyah 1&2	Jan-Des '89	37.42	69.50	0	167.40

PLTN	Periode	Volume Meter Cubic			
		Total aktivitas tinggi	Total aktivitas Rendah	Filter Mekanik	Limbah aktif kering
units, 2296 Mwe	Jan-Des '90	14.17	26.30	0	108.93
	Jan-Des '91	23.71	44.04	3.40	35.18
	Jan-Des '92	9.72	18.06	6.53	46.12
	Jan-Des '93	N/D	N/D	N/D	N/D
Diablo Canyon 1&2 units, 2160 Mwe	Jan-Des '89	15.93	15.93	0	77.45
	Jan-Des '90	11.44	11.44	0	30.13
	Jan-Des '91	30.78	30.78	0	63.46
	Jan-Des '92	5.549	8.09	4.29	44.82
	Jan-Des '93	14.79	14.79	0	51.36

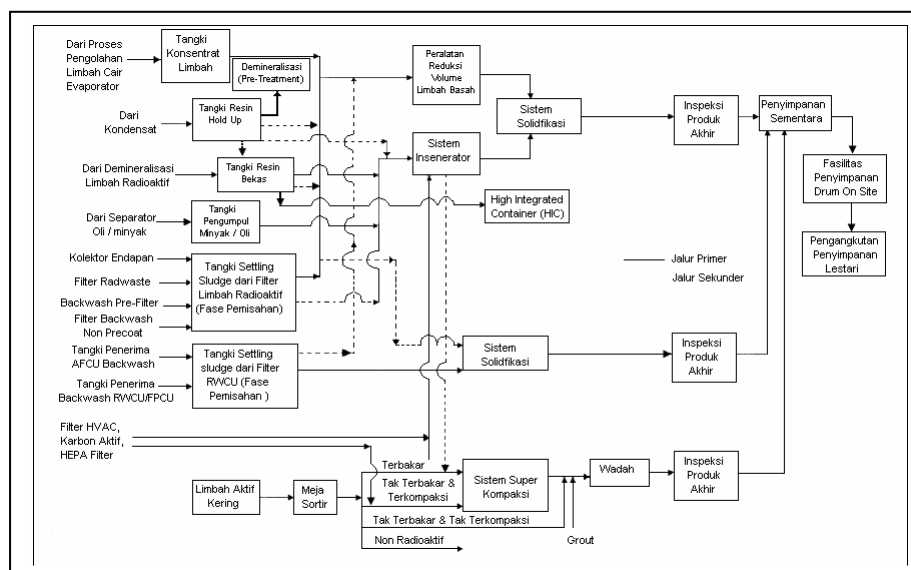
BAHAN BAKAR BEKAS

Bahan bakar yang dipakai pada PWR 1000 Mwe sebanyak 25-30 ton untuk satu siklus penggantian bahan bakar. Jumlah volume bahan bakar bekas tiap tahun dari satu PLTN sebanyak 35-50 m³. Bahan bakar bekas tidak termasuk dalam limbah tingkat rendah dan sedang tetapi masuk kategori limbah aktivitas tinggi. Bahan bakar bekas yang baru keluar dari reaktor dengan daya 1000 Mwe masih menimbulkan panas 150-200 MW dan dosis permukaan bahan bakar bekas jarak 1 meter setelah 5 tahun sebesar 25.000-50.000 mrem/jam. Untuk menurunkan panas yang disebabkan oleh gamma heating maka bahan bakar bekas disimpan dalam kolam penyimpanan sementara dimana airnya dapat berfungsi sebagai pendingin. Penyimpanan bahan bakar bekas dalam kolam sementara dekat reaktor ini selama kurang lebih 40 tahun sehingga panas dan radioaktivitasnya berkurang.

PLTN dengan daya 1000 Mwe yang beroperasi dengan kapasitas faktor sebesar 80% dan efisiensi 33 % dengan bahan bakar sekitar 27.3 MT uranium dengan pengkayaan 3,3 % akan menjadi bahan bakar bekas dengan komposisi 26 MT uranium dengan 0.83 % U-235, 246 Kg Plutonium, 951 kg produk fisi dan 25 kg transuranium.



Bahan bakar bekas secara umum dapat diperlakukan sebagai limbah aktivitas tinggi bagi negara yang menganut siklus bahan bakar terbuka maka bahan bakar bekas ini harus di simpan dalam penyimpanan tanah dalam (*deep geological disposal*). Bagi negara yang menganut siklus bahan bakar tertutup, maka bahan bakar bekas tersebut dapat dilakukan proses olah ulang. Pada proses olah ulang akan didapatkan uranium (U) sisa yang dapat dipakai sebagai bahan bakar pada PLTN. Selain itu dari proses olah-ulang diperoleh plutonium (Pu) yang dapat digunakan sebagai bahan bakar nuklir baru jenis bahan bakar campuran U dan Pu oksida yaitu jenis bahan bakar "*Mix Oxide*" (MOX). Akan tetapi pada proses olah ulang ini juga menimbulkan limbah berupa produk fisi dan limbah transuranium.



Gambar 3. Sistem pengelolaan limbah padat pada PLTN.

KESIMPULAN

Sistem pengelolaan limbah yang ditimbulkan dari operasi PLTN dapat dilakukan dengan baik dengan keselamatan yang mantap oleh negara-negara yang sudah punya PLTN, limbah yang ditimbulkan oleh PLTN PWR 1000 MWe terdiri dari limbah gas, cair (dan semi cair / limbah resin bekas) dan padat dengan aktivitas rendah, sedang dan tinggi. Limbah gas, cair dan semi cair serta limbah padat dilakukan pengolahan sehingga diperoleh limbah olahan berbentuk kemasan limbah padat yang siap disimpan. Selain itu ditimbulkan pula bahan bakar bekas yang merupakan kategori limbah aktivitas tinggi bagi negara yang menganut strategi daur (siklus) bahan bakar terbuka. Limbah yang ditimbulkan dari operasi PLTN 1000 MWe sebanyak 300-400 drum 200 liter dan bahan bakar bekas sebanyak 35-50 m³. Limbah radioaktif dari PLTN telah dilakukan pengelolaan sesuai dengan standar keselamatan nuklir.

DAFTAR PUSTAKA

1. NEWJEC, Feasibility Study of The First Nuclear Power Plants at Muria Peninsula Region, "Waste Management and Decommissioning", NEWJEC Inc., 1996.
2. KHNP, "Preliminary Safety Analysis Report", KHNP, Korea 2001
3. JEPIC, "Japan's Experiences in the Fundamental Management of Radioactive Wastes" JEPIC, 1996
4. IAEA, "Treatment of Low and Intermediate Level Solid Radioactive Wastes", Technical Reports Series No. 223, IAEA, Vienna, 1983.
5. Decommissioning of Nuclear Facilities, NEA/OECD, Paris, 1991.
6. IAEA, "Guide to The Safe Handling of Radioactive Wastes at Nuclear Power Plants", Technical Reports Series No.198, IAEA, Vienna, 1983.